



## Control de inversores conectados a la red eléctrica con aplicación en sistemas fotovoltaicos

Danieli de Guadalupe Alcalá Rodríguez<sup>1</sup>, José Miguel Sosa Zúñiga<sup>2</sup>  
<sup>1,2</sup>Instituto Tecnológico Superior de Irapuato  
<sup>1</sup>danielialcala@gmail.com  
<sup>2</sup>jmsosa@itesi.edu.mx

### Resumen

En el presente trabajo se estudian diferentes tipos de controladores de inversores de electrónica de potencia conectados a la red eléctrica sin transformador, que han sido utilizados en la literatura. Se utiliza un filtro LCL para conectar el inversor a la red eléctrica sin el uso de un transformador. Este tipo de conexión permite el acoplamiento con la red eléctrica y provee mitigación de las componentes a la frecuencia de conmutación. Sin embargo, es conveniente implementar un controlador para asegurar un funcionamiento adecuado y mitigar las posibles inestabilidades del sistema. El objetivo de los controladores en los inversores con aplicación en sistemas fotovoltaicos es, principalmente, inyectar potencia activa a la red eléctrica, lo que implica que la corriente inyectada debe estar en fase con el voltaje de la red y tener una forma de onda sinusoidal pura.



## Introducción

Los inversores fotovoltaicos son las interfaces entre los paneles fotovoltaicos y la red eléctrica que adecuan la forma de la energía eléctrica y que generalmente se clasifican en sistemas con aislamiento galvánico y sin aislamiento galvánico [1] y [2]. La conexión con aislamiento se realiza mediante un transformador de alta frecuencia o un transformador de baja frecuencia, sin embargo, tiene la desventaja de tener una baja eficiencia. La conexión sin aislamiento se realiza mediante filtros pasivos y tiene la ventaja de permitir mayores eficiencias y la reducción de espacio comparado con los que tienen transformador. El principal objetivo de los inversores en sistemas fotovoltaicos es inyectar potencia activa a la red eléctrica. Para lograr este objetivo es común utilizar un esquema de control basado en la retroalimentación de corriente de lado del inversor o de la corriente del lado de la red y posiblemente, alguna otra variable del sistema. En este trabajo se estudian y comparan diferentes controladores con base en la retroalimentación de diferentes variables del filtro pasivo.

## Objetivos

- Estudiar controladores para inversores conectados a la red a través de filtro inductivo-capacitivo-inductivo.
- Validar mediante simulación numérica los controladores.
- Obtener resultados.

## Justificación

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica sin transformador, hacen uso de un inversor y por medio de filtros pasivos se hace el acoplamiento con la red. Sin embargo, se requieren de sistemas de control para que la energía generada sea aprovechada y el sistema sea estable. La contribución de este trabajo se enfoca en el estudio de controladores para inversores conectados a la red eléctrica mediante un filtro pasivo para la inyección de potencia activa. Esto generará conocimiento que será de beneficio para investigadores y estudiantes interesados en el tema de energía solar fotovoltaica con conexión a la red



eléctrica. Las mejoras y la innovación en los sistemas de generación fotovoltaica traen como consecuencia sistemas más eficientes, confiables y de tamaño reducido que pueden ser usados en instalaciones fotovoltaicas residenciales e industriales, permitiendo el ahorro de energía eléctrica y la reducción de los costes de facturación.

## Metodología

Los inversores de electrónica de potencia son una parte esencial en los sistemas fotovoltaicos. Los inversores de fuente de voltaje, VSI (acrónimo de Voltage Source Inverter), se han utilizado en los sistemas fotovoltaicos debido a sus ventajas de costo reducido y control simple [1].

En este estudio se abordan controladores para inversores monofásicos VSI acoplados a la red eléctrica mediante un filtro inductivo-capacitivo-inductivo o LCL. El objetivo de estos inversores es inyectar potencia activa a la red eléctrica. Para lograr este objetivo, es común utilizar un esquema de control basado en la retroalimentación de algún elemento del filtro. El diagrama de un VSI conectado a la red mediante un filtro LCL se muestra en la Fig.1, donde  $i_{L_1}$  e  $i_{L_2}$  denotan las corrientes promedio a través de los inductores  $L_1$  y  $L_2$ , respectivamente,  $v_c$  denota el voltaje promedio a través del capacitor  $C$  y  $e_u$  denota el voltaje promedio a la salida del inversor. El modelo promedio del sistema de la Fig. 1, [3], está dado por:

$$L_1 di_{L_1}/dt = -v_c + e_u \quad (1)$$

$$L_2 di_{L_2}/dt = -v_c + v_s \quad (2)$$

$$C dv_c/dt = i_{L_1} - i_{L_2} \quad (3)$$

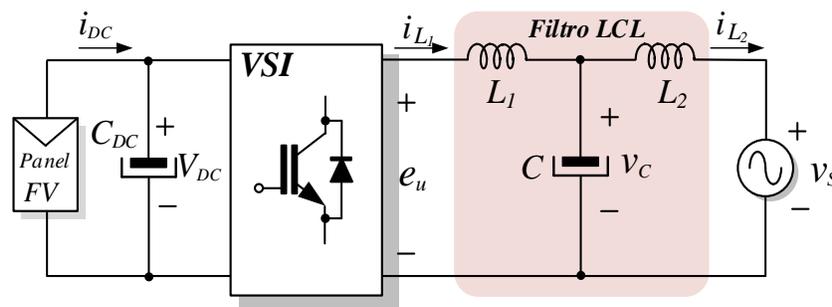


Fig. 1. Esquema de VSI conectado a la red eléctrica con filtro LCL.



Se considera que el filtro debe atenuar los armónicos de conmutación, para esto se requiere que la frecuencia de resonancia sea menor que la frecuencia de conmutación del inversor  $f_{sw}$  y que sea mayor que la frecuencia fundamental de la red eléctrica  $f_s$ , esto es  $10f_s < f_{res} < 0.5f_{sw}$  [3].

Se estudiaron cuatro estrategias de control para inyectar potencia activa a la red eléctrica, las cuales hacen uso de la medición de alguna variable del filtro LCL. Las cuatro estrategias de control son: controlador basado en la retroalimentación de la corriente del lado de la red (referido como Control 1) [4], controlador basado en la retroalimentación de la corriente del lado del inversor (referido como Control 2) [5], controlador que hace uso de la corriente del lado de la red y del lado del inversor en dos lazos de control (referido como Control 3) [6], y un controlador que hace uso de la corriente del lado de la red y de la corriente del capacitor como lazo interno (referido como Control 4) [7].

En la Tabla 1 se muestran los parámetros del sistema bajo el cual se realizaron las pruebas de simulación para los controladores. Los controladores estudiados utilizan un bloque Proporcional-Resonante (PR), el cual tiene como objetivo mitigar los componentes armónicos del voltaje de la red. El control PR consiste en dos partes una proporcional que es una ganancia, y actúa sobre el error de corriente medida del filtro LCL, y la parte resonante que consiste en un banco de filtros resonantes que mitigan los componentes armónicos múltiplos de la frecuencia fundamental del voltaje de la red.

El diagrama esquemático del sistema del Control 1 se muestra en la Fig. 2. La corriente del lado de la red  $i_{L_2}$  se compara con su valor de referencia y el resultado se procesa en un bloque PR para que el error de estado estable sea cercano a cero. La salida del controlador PR se suma con el voltaje de la red para la generación de una señal para la modulación PWM.

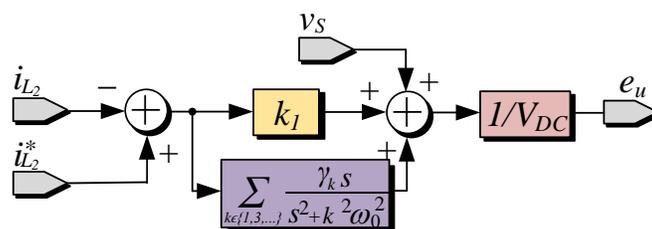


Fig. 2. Esquema del Control 1.

El diagrama esquemático del sistema del Control 2 se muestra en la Fig. 3. La corriente del lado del inversor  $i_{L_1}$  se compara con su valor de referencia y el resultado se procesa en un bloque PR para que el error de estado estable sea cercano a cero. La salida del controlador PR se suma con el voltaje de la red para la generación de una señal para la modulación PWM.

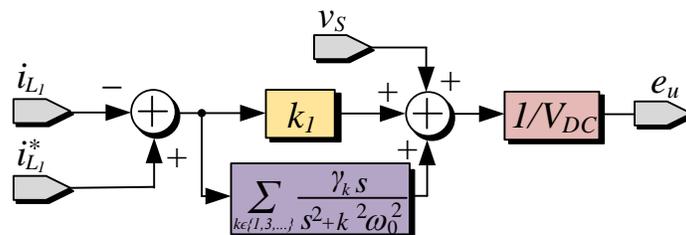


Fig. 3. Esquema de Control 2.

El diagrama esquemático del sistema del Control 3 se muestra en la Fig. 4. En este método la retroalimentación de la corriente del lado de la red  $i_{L_2}$  se utiliza como lazo externo, y la retroalimentación de la corriente del lado del inversor  $i_{L_1}$  se utiliza como lazo interno, la corriente del lado de la red se compara con su valor de referencia y el resultado se procesa en un bloque PR para que el error de estado estable sea cercano a cero. La salida del controlador PR se considera como la corriente de referencia para la corriente del lado del inversor y luego el error se procesa en un bloque P para aumentar el ancho de banda del lazo interno, ya que tiene que ser mayor al lazo externo. El resultado del lazo interno se suma con el voltaje de la red para la generación de una señal para la modulación PWM.

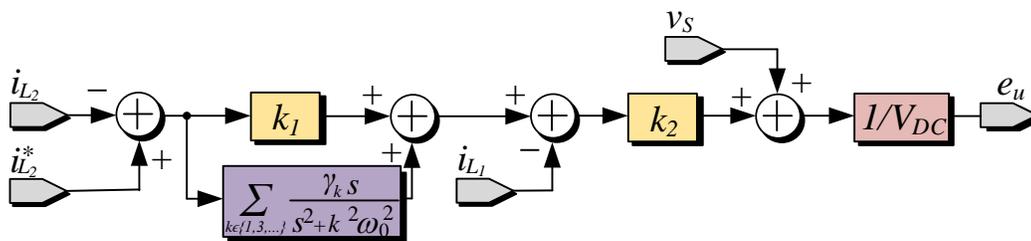


Fig. 4. Esquema de Control 3.

El diagrama esquemático del sistema del Control 4 se muestra en la Fig. 5. En este método la retroalimentación de la corriente del lado de la red  $i_{L_2}$  se utiliza como lazo externo, y la retroalimentación de la corriente de capacitor  $i_c$  se utiliza



como lazo interno, la corriente del lado de la red se compara con su valor de referencia y el resultado se procesa en un bloque PR para que el error de estado estable sea cercano a cero. La salida del controlador PR se considera como la corriente de referencia para la corriente del capacitor y se suma con el voltaje de la red para la generación de una señal para la modulación PWM.

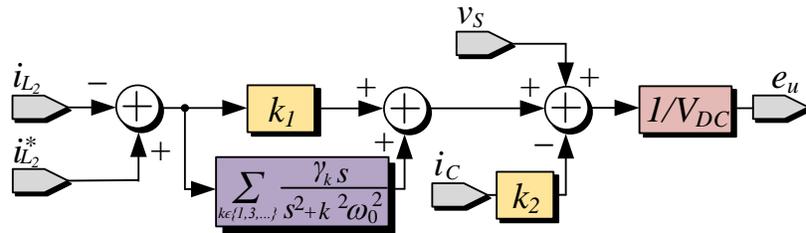


Fig. 5. Esquema de Control 4.

### Resultados

Mediante simulación numérica se evaluó en estado estacionario la operación del inversor controlado con los cuatro controladores anteriormente mencionados, inyectando a la red eléctrica una potencia activa fijada como  $P_{ref} = 3 \text{ kW}$ . En la Tabla 1 se muestran los parámetros del sistema y en la Tabla 2 se muestran los parámetros de los controladores.

Tabla 1. Parámetros del sistema.

PARÁMETRO	VALOR
$V_{S,RMS}, f_s$	127 V
$THD_V$	3 %
$L_S$	100 $\mu\text{H}$
$R_S$	0.01 $\Omega$
$L_1$	1mH
$L_2$	500 $\mu\text{H}$
$C$	15 $\mu\text{F}$
$f_{sw}$	16 kHz
$P_{ref}$	3 kW

Tabla 2. Parámetros de los controladores.

Control 1		Control 2		Control 3		Control 4	
$\gamma_1$	100	$\gamma_1$	100	$\gamma_1$	100	$\gamma_1$	100
$\omega_0$	377	$\omega_0$	377	$\omega_0$	377	$\omega_0$	377
$k_1$	0.01	$k_1$	10	$k_1$	0.1	$k_1$	10
				$k_2$	5	$k_2$	10

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con cada controlador considerando un voltaje de red con un THD de 3%. En la Fig. 6 de arriba a abajo

se muestran las gráficas del voltaje de red (color azul) y la corriente de red (color rojo), la gráfica de la corriente en el inductor  $L_1$  (color amarillo) y la gráfica del voltaje en el capacitor C (color verde) con el controlador Control 1, con el cual se obtuvo un THD de corriente de red de 1.8% y la corriente de la red tiene una forma sinusoidal pura y en fase con el voltaje de la red.

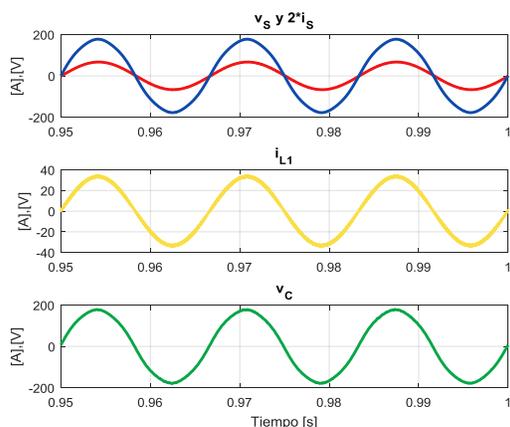


Fig. 6. Control 1: Gráficas de  $v_s$ ,  $i_{L2}$ ,  $i_{L1}$  y  $v_C$ .

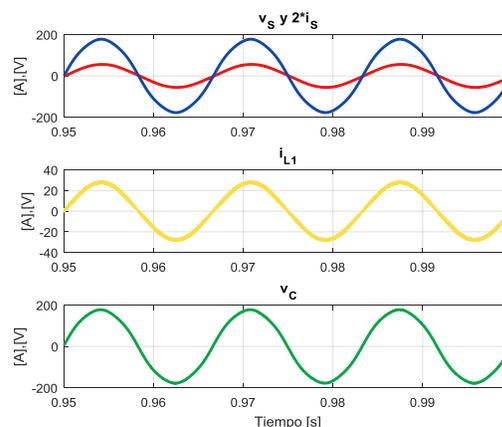


Fig. 7. Control 2: Gráficas de  $v_s$ ,  $i_{L2}$ ,  $i_{L1}$  y  $v_C$ .

En la Fig. 7 de arriba a abajo se muestran las gráficas del voltaje de red (color azul) y la corriente de red (color rojo), la gráfica de la corriente en el inductor  $L_1$  (color amarillo) y la gráfica del voltaje en el capacitor C (color verde) con el controlador Control 2, con el cual se obtuvo un THD de corriente de red de 1.57% y la corriente de la red tiene una forma sinusoidal pura y en fase con el voltaje de la red.

En la Fig. 8 de arriba a abajo se muestran las gráficas del voltaje de red (color azul) y la corriente de red (color rojo), la gráfica de la corriente en el inductor  $L_1$  (color amarillo) y la gráfica del voltaje en el capacitor C (color verde) con el controlador Control 3, con el cual se obtuvo un THD de corriente de red de 0.21% y la corriente de la red tiene una forma sinusoidal pura y en fase con el voltaje de la red.

En la Fig. 9 de arriba a abajo se muestran las gráficas del voltaje de red (color azul) y la corriente de red (color rojo), la gráfica de la corriente en el inductor  $L_1$  (color amarillo) y la gráfica del voltaje en el capacitor C (color verde) con el controlador Control 4, con el cual se obtuvo un THD de corriente de red de 1.04%

y la corriente de la red tiene una forma sinusoidal pura y en fase con el voltaje de la red.

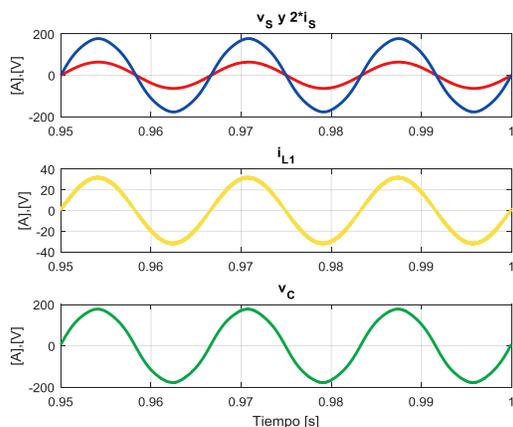


Fig. 8. Control 3: Gráficas de  $v_s$ ,  $i_{L2}$ ,  $i_{L1}$  y  $v_c$ .

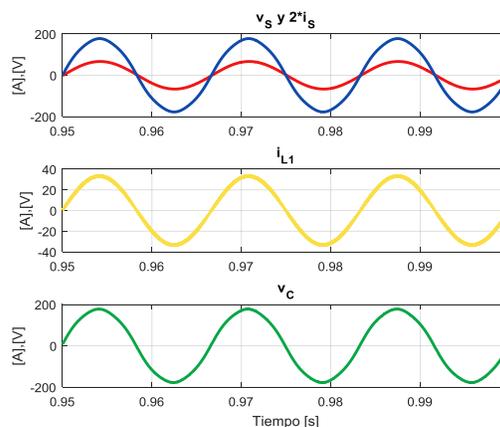


Fig. 9. Control 4: Gráficas de  $v_s$ ,  $i_{L2}$ ,  $i_{L1}$  y  $v_c$ .

En la Fig. 10 se muestra la reducción de THD de la corriente de red con respecto al THD del voltaje de la red,  $THD_v/THD_i$ , para cada controlador. La barra color rojo representa la relación de reducción de THD obtenida con el Control 1, la barra color amarillo representa la relación de reducción de THD obtenida con el Control 2, la barra color verde representa la relación de reducción de THD obtenida con el Control 3 y la barra color azul representa la relación de reducción de THD obtenida con el Control 4.

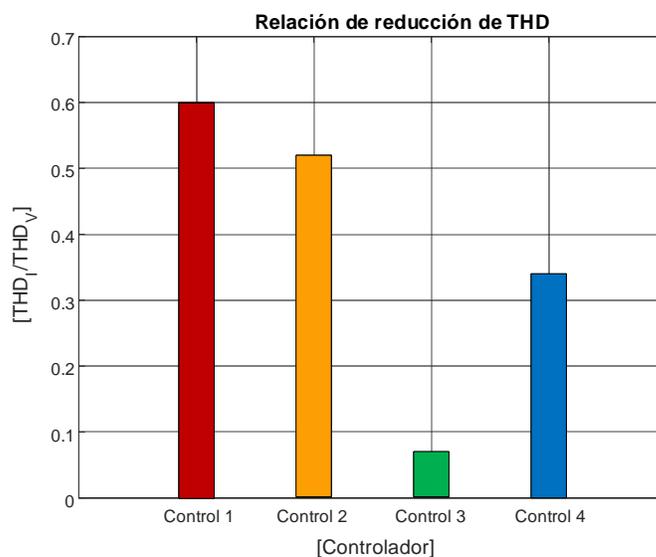


Fig. 10. Relación de reducción de THD.



En la Tabla 2 se muestran la comparación de los controladores con respecto al número de variables medidas y complejidad del controlador.

Tabla 2. Variables medidas y bloques de control para cada controlador.

	Control 1	Control 2	Control 3	Control 4
Número variables medidas	2	2	3	3
Número de bloques P	1	1	2	2
Número de bloques R	3	3	3	3

## Conclusiones

Los controladores estudiados presentan una operación comparable y aceptable en estado estacionario y en condiciones de voltaje de red con distorsión armónica total de 3%. El término proporcional del controlador que hace retroalimentación solamente de la corriente del lado de la red  $i_{L_2}$ , debe ser pequeño comparado con el mismo término en el controlador que hace retroalimentación solamente de la corriente del lado del inversor  $i_{L_1}$ . Sin embargo, el controlador que hace retroalimentación de las dos corrientes, es decir,  $i_{L_1}$  y  $i_{L_2}$ , tiene una ventaja sobre los otros tres controladores en el sentido de la mitigación de armónicos a la frecuencia de red.

Los controladores Control 1 y Control 2 en comparación con los controladores Control 3 y Control 4, hacen uso de un menor número de mediciones lo que resulta en controles más simples y de costos reducidos. El control que hace uso de la corriente del lado del inversor presenta una mejor operación en lazo cerrado que el que hace uso de la corriente del lado de la red.

## Referencias

[1] W. Li et al. (2015). "Topology Review and Derivation Methodology of Single-Phase Transformerless Photovoltaic Inverters for Leakage Current Suppression", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(7), 4537-4551. doi:10.1109/tie.2015.2399278.



- [2] Rosas M. (2014). *Convertidor CD/CA sin aislamiento con conexión a la red eléctrica para aplicaciones en paneles solares (Tesis de maestría)*. Instituto de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí.
- [3] Sosa, J., Escobar, G., Martínez, P., Vázquez, G. Juárez, M., y Diosdado, M. (2014). *Comparative evaluation of L and LCL filters in transformerless grid tied converters for active power injection. 2014 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*. doi:10.1109/ropec.2014.7036284.
- [4] Xu, J., Xie, S., y Tang, T. (2014). *Active Damping-Based Control for Grid-Connected LCL-Filtered Inverter With Injected Grid Current Feedback Only. IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(9), 4746-4758. doi:10.1109/tie.2013.2290771.
- [5] Escobar, G., Martinez, P., Ho, C., y Sosa, J. (2017). *Design of an inverter-side current reference and controller for a single-phase LCL-based grid-connected inverter. International Transactions on Electrical Energy Systems*, 28(1), e2476. doi:10.1002/etep.2476.
- [6] Shen, G., Zhu, X., Zhang, J., y Xu, D. (2010). *A New Feedback Method for PR Current Control of LCL-Filter-Based Grid-Connected Inverter. IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(6), 2033–2041. doi:10.1109/tie.2010.2040552.
- [7] Wang, X., Bao, Ch., Ruan, X., Li, W., y Pan, D. (2014). *Design Considerations of Digitally Controlled LCL-Filtered Inverter With Capacitor- Current-Feedback Active Damping. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2(4), 972–984. doi:10.1109/jestpe.2014.2350262.